

Покровский В. Расчётно-экспериментальное исследование вязкости разрушения теплоустойчивых реакторных сталей с учётом различных мод предварительного термомеханического нагружения / Покровский В., Сидяченко В., Езов В. // Вісник ТНТУ. — 2011. — Спецвипуск — частина 1. — С.66-73. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 539.4

**В. Покровский, докт. техн. наук; В. Сидяченко, канд. техн. наук;  
В. Езов, канд. техн. наук**

*Институт проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины,  
г.Киев, Украина*

## **РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ С УЧЁТОМ РАЗЛИЧНЫХ МОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

**Резюме.** Представлено результати експериментальних досліджень впливу попереднього термомеханічного навантаження за модою навантаження I та II на тріщиностійкість зразка на чотири точковий згин. Зразок піддавався повторному навантаженню по модам II і I. Дослідження було виконано на теплостійких реакторних сталях. Запропоновано алгоритм чисельної оцінки в'язкості руйнування з урахуванням попереднього термомеханічного навантаження при змішаних схемах деформування.

**Ключевые слова:** моди навантаження, попереднє термомеханічне навантаження, теплостійкі реакторні сталі.

**V.Pokrovsky, V.Sydiachenko, V.Yezhov**

## **EXPERIMENT-CALCULATED INVESTIGATION OF THE FRACTURE TOUGHNESS OF REACTOR PRESSURE VESSEL STEELS UNDER DIFFERENT MODES OF WARM PRESTRESSING**

**The summary.** Load bearing capacity of cracked specimens can be improved following pre-loading procedures like warm prestressing (WPS). In this paper, the effects of modes I and II pre-loading on fracture load of a four point bend specimen are studied. The specimen is reloaded either in mode I or in mode II. Investigations were carrying out for heat resistant steels. An algorithm of numerical calculation of fracture toughness after warm preloading under mixed mode fracture is proposed.

**Key words:** loading modes, warm prestressing, reactor pressure vessel steels.

**Постановка проблемы.** Предварительное термомеханическое нагружение (ПТН) способствует повышению сопротивления хрупкому разрушению теплоустойчивых сталей с трещинами и является фундаментальной основой перспективного метода увеличения ресурса для обеспечения безопасной эксплуатации корпусов энергетических реакторов типа ВВЭР. Многочисленные экспериментальные данные о влиянии ПТН на хрупкую прочность теплоустойчивых сталей ограничены исследованием трещиностойкости по механизму нормального отрыва (мода I) [1-3]. Сведения о влиянии ПТН при различных модах на вязкость разрушения сталей с трещинами весьма ограничены и противоречивы [4-7]. В то же время в реальных конструкциях ориентация плоскости трещин по отношению к приложенным нагрузкам произвольна. Поэтому весьма важно учитывать, что ПТН, а также последующее эксплуатационное нагружение приводит к деформированию изделия с трещиной не по моде I, а по любой моде, в том числе по смешанным модам: I+II или I+III.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В целом имеющиеся данные для корпусных реакторных сталей свидетельствуют о том, что ПТН по моде I вызывает увеличение вязкости разрушения на нижнем шельфе температурной зависимости [1-3]. Однако при этом отмечается, что увеличение в процессе нагружения составляющей поперечного сдвига (мода II) способствует переходу от хрупкого (скольного) характера к вязкому (ямочному) даже в условиях низких ( $-120^{\circ}\text{C}$ ) температур [4]. В этих случаях ПТН по моде I и II не оказывает влияния на вязкость разрушения при поперечном сдвиге. Когда ПТН производится по моде II, вязкость разрушения по моде I снижается на 60% по сравнению с исходной [4].

Авторы работы [5] в результате конечно-элементного анализа пластины с наклонной трещиной, подверженной ПТН при различных модах нагружения, подтвердили данные ранее полученных экспериментальных исследований [4], за исключением случая снижения вязкости разрушения по моде I после ПТН по моде II. По данным расчётов наблюдается обратная тенденция, т.е. увеличение вязкости разрушения на 190...280% в зависимости от относительной длины трещины [5].

Целью данной работы является экспериментальное изучение влияния ПТН по модам I и II на вязкость разрушения по модам II и I реакторных сталей, а также применение численного моделирования для анализа полученных экспериментальных данных.

**Методика экспериментальных и численных исследований.** Экспериментальные исследования выполнялись на теплоустойчивых корпусных сталях 15X2НМФА(II) и 15X2МФА(II). Механические свойства материалов приведены в таблице.

Таблица. Механические свойства исследованных материалов

Материала	$t, ^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{0.2}, \text{МПа}$	$\sigma_s, \text{МПа}$
15X2МФА(II)	180	949	1129
	20	1014	1193
	-150	1311	1486
15X2НМФА(II)	180	590	668
	20	636	735
	-150	970	1024

Для исследования влияния ПТН при смешанных I+II модах нагружения образец должен удовлетворять следующим критериям: реализация полного диапазона I+II мод нагружения, компактность и возможность испытаний при высоких и низких температурах, простота в изготовлении, возможность инициировать трещину по моде нагружения I. Этим требованиям удовлетворяет призматический образец на несимметричный четырёхточечный или трёхточечный изгиб.

Практическая реализация схемы нагружения, а также зависимости для определения КИН, приведены в работе [7].

Исследования характеристик трещиностойкости при поперечном сдвиге проводились на призматических образцах  $270 \times 40 \times 20$  мм (длина, ширина, толщина), с утонченной до 10 мм толщиной рабочей зоны и предварительно выращенной по моде I усталостной трещиной относительной длины  $0,5W$ . Нагружение осуществлялось в жестком режиме с постоянной скоростью перемещения подвижного захвата около 0,5 мм/мин. В процессе проведения эксперимента записывалась диаграмма «нагрузка – перемещение активного захвата». При расчете КИН использовалась нагрузка, рассчитанная по 5% секущей из вышеупомянутой диаграммы и длина трещины

соответствующая её страгиванию, которая уточнялась по изломам образцов. Таким образом, в данной работе под вязкостью разрушения подразумевается условное значение КИН, соответствующее страгиванию трещины.

ПТН осуществлялось по схеме с полной разгрузкой, а именно: образец нагревался до температуры выше хрупко-вязкого перехода – нагружался до уровня 85%...90%  $K_c$  при соответствующей моде нагружения, охлаждался – разрушался. При этом изучались следующие комбинации влияния ПТН на трещиностойкость:

ПТН по моде I – разрушение по моде II;

ПТН по моде II – разрушение по моде I;

ПТН по моде II – разрушение по моде II.

Для численных исследований влияния ПТН по моде II на вязкость разрушения по моде I использовался программный комплекс ANSYS (ver. 11.0). Конечноэлементная модель образца с трещиной на четырёхточечный несимметричный изгиб строилась, предполагая плоское деформированное состояние, упругопластическое поведение материала с кинематическим законом упрочнения и геометрическую нелинейность. Механические свойства для расчёта при соответствующих температурах приведены в таблице. Вершина трещины моделировалась в виде математического разреза 6-ти узловыми треугольными конечными элементами "Plane183", размер которых составлял 125 мкм, что приблизительно соответствует размеру зерна для данного материала [8].

**Экспериментальные данные и их анализ.** ПТН оказывает влияние на сопротивление хрупкому разрушению теплоустойчивых сталей при определенных термосиловых режимах. Поэтому для проведения экспериментальных исследований влияния ПТН на прочностные характеристики теплостойчивых сталей необходимо знать величины вязкости разрушения, а также установить характер разрушения этих сталей в зависимости от температуры испытаний.

Были проведены испытания на вязкость разрушения при нагружении по моде II и эти данные сравнивались с температурной зависимостью вязкости разрушения при нагружении по моде I, полученной ранее [9].

Закономерности изменения вязкости разрушения свидетельствуют о различном поведении реакторных сталей в зависимости от температуры испытаний (рис.1).

Разрушение СТ-1 образцов из стали 15X2МФА(II) при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$  имеет хрупкий характер, при этом температура вязко-хрупкого перехода при  $K_{Ic}=100 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  составляет  $+50^{\circ}\dots+70^{\circ}\text{C}$ , а для стали 15X2НМФА(II)  $-50^{\circ}\dots-70^{\circ}\text{C}$ .

Анализ разрушения по второй моде нагружения стали 15X2МФА(II) показывает хрупкое разрушение при температурах  $-150^{\circ}\dots-90^{\circ}\text{C}$ , о чём свидетельствует хрупкий (ручейстый) характер излома и угол распространения трещины, близкий к  $70^{\circ}$  относительно первоначальной плоскости трещины при доломе образца, что соответствует критерию максимальных нормальных напряжений (обобщённый отрыв). В то же время при температуре испытаний  $-60^{\circ}\text{C}$  было незначительное вязкое подрастание трещины в плоскости максимальных сдвиговых деформаций, предшествующее хрупкому долому образца. А при  $+20^{\circ}\text{C}$  и выше трещина росла в плоскости максимальных деформаций сдвига вплоть до разрушения.

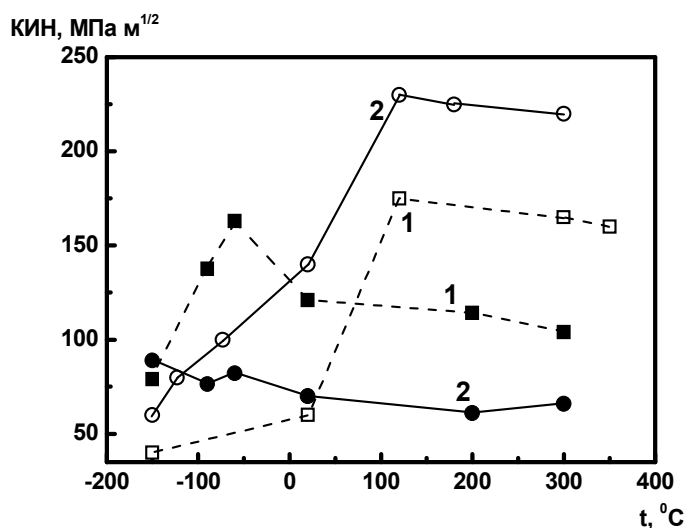


Рисунок 1. Залежність вязкості розриву реакторних сталей при навантаженні по моді I (світлі точки) і моді II (темні точки) від температури: 1 – 15X2МФА(II); 2 – 15X2НМФА(II)

Аналіз изломов образцов стали 15X2НМФА(II), испытанных при поперечном сдвиге, показывает, что при всех исследованных температурах наблюдалось инициирование трещины в направлении максимальных сдвиговых деформаций и угол отклонения от первоначальной плоскости трещины был незначительный (около  $5^0 \dots 8^0$ ).

В целом из рис.1 видно, что переход к навантаженню по моді II приводит к снижению вязкости разрыва, определённой по страгиванию трещины при температуре выше температуры хрупко-вязкого перехода. Выполненные экспериментальные исследования, а также обзор литературы показал, что при навантаженні по смешанным модам (I+II) или при чистой моді II у вершины трещины образуется неоднородное поле напряжений. Под этим подразумевается, что один берег трещины у её вершины затупляется и преобладают растягивающие напряжения, а другой (противоположный) заостряется и в этой области преобладают деформации сдвига. Преобладание одного из этих механизмов зависит от коэффициента смешанности нагрузок, деформационного упрочнения, пластических свойств и микроструктуры материала. Это в конечном итоге определяет направление дальнейшего развития трещины, а также величины характеристик трещиностойкости в случае навантаження при поперечном сдвиге. Отмечаются следующие закономерности: для вязких материалов вязкость разрыва при смешанных модах уменьшается при увеличении в навантаженні сдвиговой компоненты (по моді II), для хрупких материалов наблюдается обратная тенденция. Поэтому расчёты на трещиностойкость элементов конструкций, которые деформируются по моді, отличной от моды I и изготовлены из пластичных материалов, на основе характеристик вязкости разрыва, полученных по стандартной методике, могут привести к неконсервативной оценке.

В целом обобщение экспериментальных данных и сведений из литературы [10] показывает, что увеличение условного предела текучести приводит к повышению  $K_{IIc}$  и уменьшению  $K_{Ic}$ . Для стали 9ХФ в зависимости от термообработки увеличение  $\sigma_{0,2}$  от 350 МПа до 450 МПа приводит к повышению  $K_{IIc}$  на 16% и снижению  $K_{Ic}$  на 33%. Таким образом, отношение  $K_{Ic}/K_{IIc}$  с увеличением  $\sigma_{0,2}$  снижается, что характерно также для исследованных сталей, особенно в диапазоне температур  $-50^0C \dots +200^0C$  (рис.2).

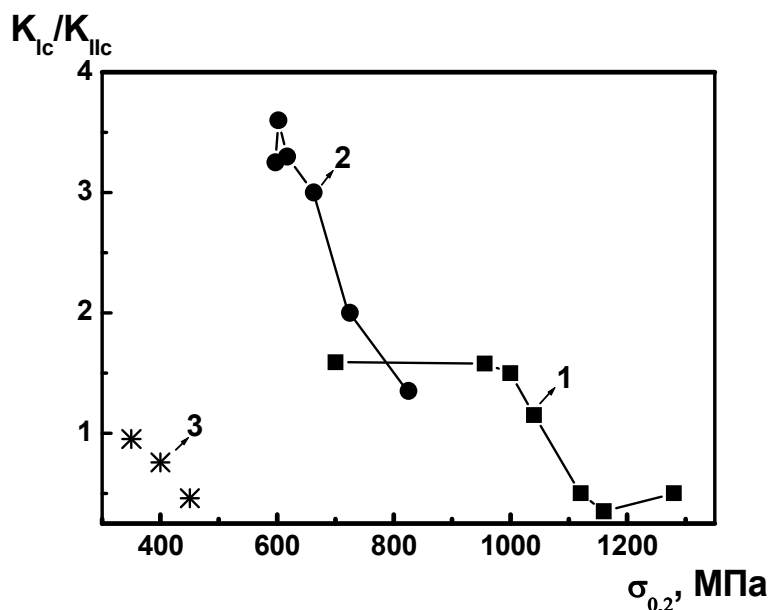


Рисунок 2. Зависимость отношения вязкостей разрушения при нормальном отрыве и поперечном сдвиге от условного предела текучести: 1 – 15Х2МФА(II); 2 – 15Х2НМФА(II); 3 – 9ХФ [10]

Для осуществления ПТН была выбрана температура  $+180^{\circ}\text{C}$ . Это обусловлено тем, что для изучаемых материалов при этой температуре имело место вязкое разрушение. ПТН осуществляли до уровня 85% от величины соответствующего критического значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при данном виде нагружения и температуре. На рис. 3 приведены данные, иллюстрирующие влияние ПТН по моде II на статическую вязкость разрушения, полученную при аналогичном виде нагружения.

Из приведенных данных видно, что ПТН по моде II, по схеме «с полной разгрузкой» для стали 15Х2НМФА(II) как при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$ , так и при  $-150^{\circ}\text{C}$  не оказывает влияния на вязкость разрушения. А для стали 15Х2МФА(II) при температуре  $-150^{\circ}\text{C}$  наблюдается увеличение вязкости разрушения в 1,8 раза от величины  $K_{Ic}$  при  $K_{ПТН}=100 \text{ МПа м}^{1/2}$  (рис.3).

Анализ изломов соответствующих образцов показал, что для обеих сталей ПТН не влияет на угол распространения трещины при нагружении по моде II. Причём для стали 15Х2НМФА(II), у которой условный предел текучести ниже, чем у 15Х2МФА(II), при температуре  $-150^{\circ}\text{C}$  и нагружении по моде II после соответствующего ПТН по этой же моде наблюдалось пластическое подрастание трещины около 6,5...7 мм, аналогичное тому, какое было без ПТН.

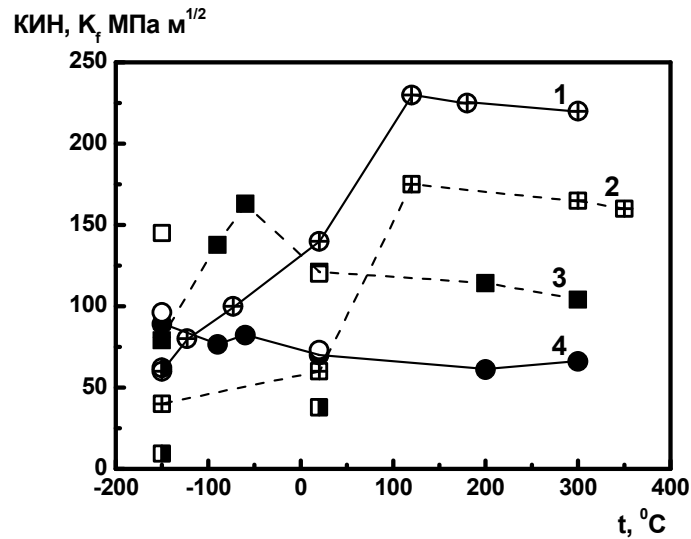


Рисунок 3. Температурная зависимость вязкости разрушения при различных схемах деформирования: 1, 2 – мода I; 3, 4 – мода II; ○, □ – ПТН мода II, разрушение мода II; ●, ■ – ПТН мода II, разрушение мода I; \* – ПТН мода I, разрушение мода II; 1, 4, ○, ●, \* – 15X2МФА(II); 2, 3, □, ■ – 15X2МФА(II)

Анализ экспериментальных данных для стали 15X2МФА(II), иллюстрирующих влияние ПТН по моде II на характеристики статической трещиностойкости по моде I показал, что после ПТН  $K_f$  составляет лишь 24% и 64% от  $K_{Ic}$  при температурах  $-150^{\circ}\text{C}$  и  $+20^{\circ}\text{C}$  соответственно. Вместе с тем для более пластичной стали 15X2НМФА(II) ПТН по моде II не оказывает влияния на  $K_f$  и  $K_f = K_{Ic}$  (рис. 3).

**Численное моделирование ПТН.** Смоделируем наиболее неблагоприятный случай понижения  $K_f$  по моде I при температуре  $-150^{\circ}\text{C}$  после ПТН по моде II для 15X2МФА(II).

Критерием хрупкого разрушения при температуре  $-150^{\circ}\text{C}$  было достижение максимальным растягивающим напряжением критического значения  $\sigma_c$  на характеристическом расстоянии  $r_c$  вокруг вершины трещины [11, 12]:

$$\sigma_{\max}|_{r=r_c} = \sigma_c. \quad (1)$$

Моделирование осуществлялось по следующему алгоритму. На первом этапе определяли распределение нормальных напряжений у вершины трещины при нагружении до уровня  $K_{Ic} = 40 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  образца на трёхточечный изгиб при температуре  $-150^{\circ}\text{C}$ .

Характеристика материала ( $r_c = 170 \text{ мкм}$ ) определялась как расстояние от вершины трещины до места, где нормальные напряжения в плоскости трещины достигнут величины напряжения отрыва. На втором этапе моделировался эффект ПТН: нагружение по моде II (четырёхточечный изгиб) при температуре  $180^{\circ}\text{C}$  и затем полная разгрузка. На третьем этапе осуществляли нагружение по моде I и температуре  $-150^{\circ}\text{C}$  до разных уровней КИН и строили распределение максимальных растягивающих напряжений на расстоянии  $r_c$  вокруг вершины трещины с учётом предыстории нагружения, т.е. ПТН по моде II (рис. 4 б).

Из рис. 4 б видно, что критическое напряжение  $\sigma_c$  на расстоянии  $r_c$  от вершины после ПТН достигается при  $K_f = 22 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , что в 2 раза меньше  $K_{Ic} = 40 \text{ МПа}$

$m^{1/2}$  без ПТН. Причём максимальные растягивающие напряжения отклоняются от плоскости трещины приблизительно на  $72^0$ , что соответствует экспериментально установленному углу отклонения распространения трещины по моде I после ПТН по моде II. При этом отметим, что несмотря на то, что моделирование не совпало с экспериментально определённым для этого случая значением  $K_f=10 \text{ МПа } m^{1/2}$  вследствие упрощённой двумерной модели и других принятых допущений, но тенденция к уменьшению  $K_f$  по моде I после ПТН по моде II подтвердилась.

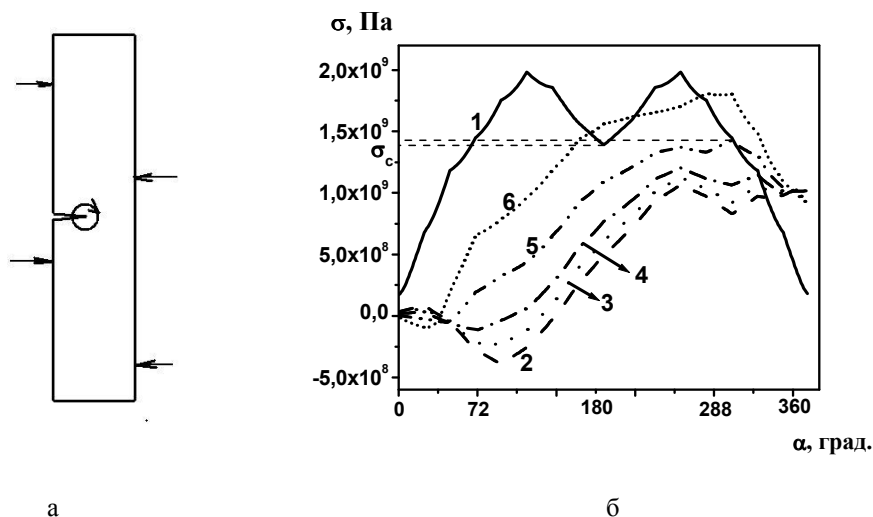


Рисунок 4. Схема нагружения по моде II и система отсчёта угла  $\alpha$  (а) и распределение напряжений в зависимости от угла  $\alpha$  в слое на расстоянии  $r_c$  вокруг вершины трещины,  $t=-150^0\text{C}$ , мода I (б): 1 – без ПТН,  $K_{Ic}=40 \text{ МПа } m^{1/2}$ ; 2-6 после ПТН: 2 –  $K=0,44 \text{ МПа } m^{1/2}$ , 3 –  $K=4,4 \text{ МПа } m^{1/2}$ , 4 –  $K=9,6 \text{ МПа } m^{1/2}$ , 5 –  $K=22 \text{ МПа } m^{1/2}$ , 6 –  $K=40 \text{ МПа } m^{1/2}$

**Выводы.** В результате комплексного экспериментального исследования было показано, что характеристики трещиностойкости при поперечном сдвиге (мода II) меньше чем при нормальном отрыве (мода I) при температуре выше температуры хрупко-вязкого перехода, и наоборот, больше ниже этой температуры.

Было установлено, что предварительное термомеханическое нагружение по моде II вызывает увеличение вязкости разрушения по моде II и понижение по моде I для охрупченных реакторных сталей и мало влияет для пластичных, что обусловлено не симметричной вдоль берегов трещины системой остаточных напряжений.

Для объяснения полученных экспериментальных результатов и построения модели разрушения после ПТН по II моде нагружения необходим дальнейший трёхмерный упругопластический численный анализ напряженного состояния у вершины трещины при ПТН, выполненный для материалов с различными механическими свойствами.

#### Литература

1. The influence of plastic pre-stressing on brittle fracture resistance of metallic materials with cracks / V.V. Pokrovsky, V.T. Troshchenko, G.A. Kopchinsky [and other] // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1995. – Vol.18, №6. – P. 731–746.
2. A promising method for enhancing resistance of pressure vessels to brittle fracture / V.V.Pokrovsky, V.T.Troshchenko, V.G.Kaplunenko [and other] // Int. J. Pres. Ves. Piping. – 1994. – Vol.58. – P.9–24.
3. Chell, G.G. A theory of warm pre-stressing: experimental validation and the implication for elastic - plastic

- failure criteria / G.G.Chell, J.R.Haigh, V.A.Vitek // Int. J. Fract. – 1981. – Vol.17, No.1 - P. 61-82.
4. Swankie, T.D Low temperature mixed mode fracture of a pressure vessel steel subject to prior loading / T.D.Swankie, D.J.Smith // Eng. Fract. Mech. – 1998. – Vol.61. – P. 387–405.
  5. Ayatollahi, M.R., Mostafavi M. Finite element analysis of a center crack specimen warm pre-stressed under different modes of loading / M.R.Ayatollahi, M.Mostafavi // Comput. Mater. Sci. – 2007. – Vol.38. – P.847–856.
  6. Прогнозирование влияния предварительного термомеханического нагружения на вязкость разрушения корпусных теплоустойчивых сталей при смешанных схемах деформирования [Текст] / В.В.Покровский, В.Г.Сидяченко // Прочность материалов и элементов конструкций: междунар. науч.-техн. конф., 28–30 сент. 2010 г.: труды. – Киев, 2011. – С.340 – 348.
  7. Исследование закономерностей развития трещин при смешанных модах нагружения [Текст] / В.В. Покровский, В.Н. Ежов, В.Г. Сидяченко, Ю.И. Коваль // Механическая усталость металлов: 13-ый междунар. кол-ум., 25-28 сент. 2006 г.: труды. – Тернополь, 2006. – С.259–265.
  8. Yasnii, P.V. Assessment of brittle strength of nuclear reactor pressure vessel steel upon warm prestressing / P.V. Yasnii, I.B. Okipnyi, Yu.I. Pyndus. // Strength of Materials – 2010. – 42, №1. – P. 32–37.
  9. Pokrovskii, V.V. Influence of the modes of thermomechanical preloading on the resistance of heat-resistant steels to brittle fracture / V.V.Pokrovskii, A.G.Ivanchenko // Strength of materials. – 1999. – Vol.31. – P.200–209.
  10. Иваницкий, Я.Л. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов в условиях сложного нагружения / [Текст] дис. ... доктора техн. наук: 01.02.04 / Ярослав Лаврентьевич Иваницкий. – Львов, 2005. – 368 с.
  11. Pisarenko, G.S. Analysis of kinetics of quasibrittle fracture of crystalline materials / G.S. Pisarenko, A.I. Krasowsky // Mech. Behavior of Materials: int. conf., 1972: proc. – Kyoto, 1972. – P.421–432.
  12. Ritchie R.O. On the relation between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel / R.O.Ritchie, J.F.Knott, J.R.Rice // J. Mech. Phys. Solids. – 1973. – Vol.21, №6. – P.395–410.